

■ 中性子光学素子の開発と 中性子分光法の研究

中性子光学研究グループ ■ 清水 裕 彦*

Development of Neutron Optical Devices and Their Applications

Hirohiko SHIMIZU

Research Group for Neutron Optics

Improvement of neutron optical devices introduces flexibilities in the optimization of experimental configuration, which lead to increase the neutron utilization efficacy. We report the present status of the development of neutron magnetic optics and application to the small-angle neutron scattering in focusing geometry.

1. はじめに

中性子は、X線を含む光子や電子などと異なり、原子程度の質量を持つ中性粒子であり、原子以上のスケールを持つ集団的な励起に対して高い感度を持つ。また、主に物質中の原子核と相互作用をするので、相互作用の強さは原子番号に対して単調な依存性を持たず、同位体に対しても比較的強い依存性を持つ。したがって、軽元素に対して相対的に高い感度を示すと同時に、中性子スピンの磁性に対する高い解析能力や、優れた物質透過能力などを併せ持つ極めて魅力的なプローブである。加えて中性子は複雑な原子核構造も電荷も持たない中性粒子の中で桁違いに寿命が長く、比較的大量に発生が可能なため、微弱な相互作用の精密測定に適している。

しかし、中性子は原子核反応によって発生させることが必要なため、強い中性子ビームを得られる場所が原子炉や加速器施設に限られる上に、ビームの輝度が光子等に比べて桁違いに弱いという問題を抱えてい

る。本研究グループでは中性子光学の基礎研究及び応用研究を推進し、中性子ビームを光学的に制御することにより、中性子ビームの利用効率を向上し、ビーム輝度を向上させたと同等の解析能力を実現することを目指している。

物質研究に用いられる中性子の運動エネルギーは $\text{meV} \sim \text{eV}$ のオーダーである。このエネルギー領域における原子核との相互作用はs波のみを考慮すれば十分である。中性子の波長は原子の大きさ程度以上であり、物質との相互作用は顕著な波動性に支配される。主たる挙動は、核ポテンシャルを原子体積で平均して得られる「有効ポテンシャル」で表現できる。中性子は有効ポテンシャルに変化のある界面において反射及び屈折を受けるため、物質界面を光学要素として利用できる。その他に、中性子は磁気双極子能率を持つため、不均一磁場中では加速度を受ける。また、単結晶や人工的な多層膜構造を用いることにより、中性子が回折条件を満たす方向に流速を制限することが可能である。さらに、磁気散乱や核相互作用のスピン依存項

* 独立行政法人理化学研究所 副主任研究員

などの相互作用、地球との重力相互作用がある。これらの原理や組み合わせに基づき、中性子光学には様々な区分が有り得る。

本稿では磁気屈折光学を利用した集光型中性子小角散乱を中心とした研究成果について述べる。なお、本研究の多くは科学技術振興調整費「中性子光学素子の開発と応用」(NOP)の一部として研究が進められており、基礎研究から応用研究に移行する段階にある^{1, 2)}。

2. 磁気屈折光学

非均一磁場中を中性子が運動する際には、中性子から見た磁場は大きさ及び方向が変化する。中性子から見た磁場の方向の回転角速度が、局所磁場に対応するラーモア歳差角速度に比べて遅い場合には、中性子の偏極度は磁場方向に追従する。このような条件の下での中性子が受ける加速度は、磁場を $\mathbf{B}$ とするとき、 $\mathbf{a} = \pm \alpha \nabla |\mathbf{B}|$ で与えられる。ただし、 $\alpha = 5.77 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ T}^{-1}$ で、複号はスピンの局所的な磁場と平行の場合に一、反平行の場合に十である。非均一磁場が六極磁場の場合を考える。磁石軸を z 軸にとり磁場を $|\mathbf{B}| = (G/2)(x^2 + y^2)$ とおくと、運動方程式は $d^2x/dt^2 = \pm \omega^2 x$, $d^2y/dt^2 = \pm \omega^2 y$ と単純になる。ただし $\omega = \sqrt{\alpha G}$ である。スピンの局所的な磁場と平行な場合には、磁石軸 ($x, y = 0$) 周辺での単振動となるため、この機能を集束レンズとして利用することができる。(集束効果そのものは六極磁場に限った性質ではない。) 磁気集束レンズに非偏極ビームを入力した場合、出力ビームは最大でも入力ビームの半数となる。磁気レンズは、レンズ内での散乱や吸収がなく、ビームの軌跡を正確に計算でき、正確な結像性能を持つ。

開発を進めている磁気レンズには、超伝導六極電磁石、永久六極磁石、パルス六極電磁石の3種類がある。

超伝導六極電磁石は、Nb/Ti線を用いて $G = 12800 \text{ Tm}^{-2}$ の磁場勾配を得るもので、有効長は2 m、口径は46.8 mmである(図1)³⁾。JRR-3のC3-1-2-1ビームライン(NOPビームライン)において、集光性能評価を行った。磁石入り口から上流に約1.5 mの位置に直径2 mmのピンホールコリメータを置き、そこを通過した波長14.4 Åの非偏極の発散中性子ビームを磁

石に入射させた。磁場がかかっていない時にはビームが発散するが、磁場がかかっているとスピンが磁場に平行な成分が磁石軸上の磁石の出口から約1.5 m下流の位置にビームが集光される。その様子を図1に示す。このとき中心軸上でのビーム輝度は、磁場印可時には磁場非印可時に比べて100倍以上増加している。

永久六極磁石は強力ネオジウム磁石を用いた拡張型ハルバツハ型の磁極配列を持つ六極磁石であり、 $G = 23500 \text{ Tm}^{-2}$ の磁場勾配が得られる。外観は図2に示した通りで、口径は25 mmである⁴⁾。これについても良好な集光特性が得られており、JRR-3において中性子小角散乱装置(SANS-J)の集光化に取り組んでいる。

パルス六極電磁石は口径は25 mm、有効長は2 mで

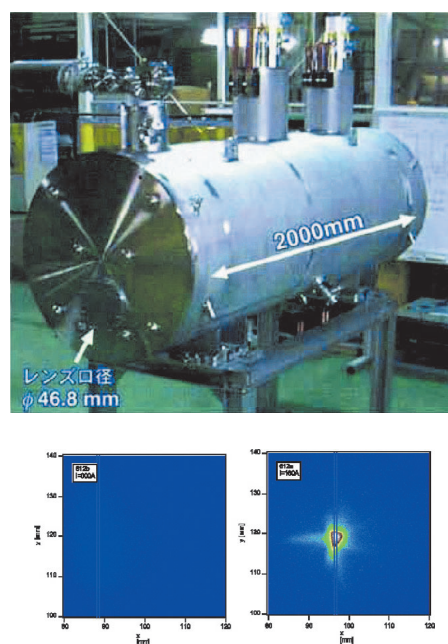


図1 超伝導六極電磁石、及び磁場を印加した場合(右)と印加しない場合(左)の焦点面におけるビーム像

ある⁵⁾。本体部分の外観を図3に示す。現有の駆動電源で繰り返し周波数10 Hz程度で運転した場合に、最大 $G = 8000 \text{ Tm}^{-2}$ 程度の磁場勾配が得られる見込みである。北海道大学工学部にある45 MeV電子線形加速器を用いたパルス中性子源を利用して性能評価を進めるべく準備を進めている。



図2 拡張型ハルバッハ型永久六極磁石



図3 パルス六極電磁石

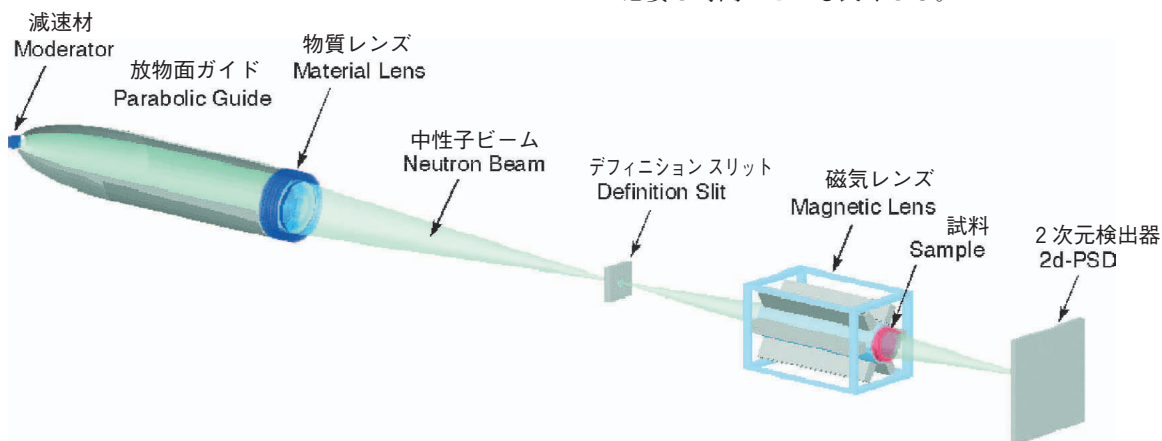


図4 集光型小角散乱装置の概念図

3. 集光型小角散乱

以上のような要素技術開発の成果を元にした新たな物質解析手法の一つとして、図4に示すような集光型小角散乱法がある⁶⁻⁹⁾。通常の小角散乱測定では、ガイド管からの出力ビームをダブルスリットに通すことにより得られる細くて平行度の高いビーム成分を試料に照射する。そして、試料から十分に離れた場所に検出器を配置し、小さな散乱角で散乱された中性子を検出する。この場合、より小さな散乱角まで測定するには、より平行度の高いビームが必要となるため、ダブルスリットのコリメーションをきつくし、より多くの中性子を切り捨てることになる。よって、ビームの量は極端に減少する。結果として、測定可能な散乱角または移行運動量に制限が付く。移行運動量は、波数ベクトルの変化量 $q = k_i - k_f$ で表現される。現在、JRR-3における小角散乱装置 SANS-J では、測定可能な q の最小値は概ね $10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ のオーダーである。 q に対応する波長は物理対象の空間的スケールを与えるので、これは $1000 \text{ \AA}$ 程度以下の空間的スケールを持った構造が観測できることを意味する。もしこの測定可能な空間スケールをより大きくできれば、生体分子などの巨大分子やより高次の階層構造を研究対象に含めることができるようになる。ただし、単結晶回折光学系を利用するボンゼーハート法では、さらに小さな $10^{-5} \text{ \AA}^{-1}$ 程度の q 領域までの測定が可能であるが、測定に必要な時間はとても長くなる。

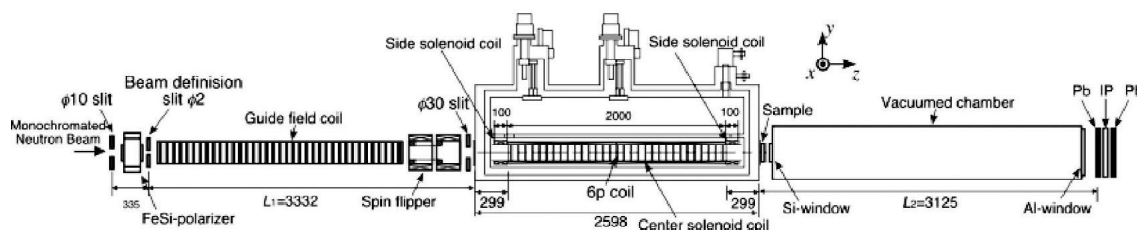


図5 集光型小角散乱実験のセットアップ

さて、集光型小角散乱法では、単一のスリット（図中のデフィニション・スリット）を通過させて得られる発散ビームを集光光学系により検出器面に結像させる。その集光光学系の途中で試料を配置しておく、散乱中性子は結像面上の違う位置で検出されることになる。したがって、測定可能な散乱角の領域は、結像面上の非散乱中性子の像の大きさによって制限されるのみで、試料の大きさには依らない。その結果、試料を大きく取れる分だけ利用可能な中性子量が増加することになり、測定可能な q 領域を一挙に $10^{-4} \text{ \AA}^{-1}$ 程度まで広げることが可能となる。これは中性子利用効率に換算すると、数100倍の利得を得たことに相当する。もっとも、ダブルスリット型の小角散乱装置では、元々この q 領域を測定することが無かった訳であるから、比べることに意味がないと考えた方が正しい。

実際に集光型小角散乱の光学系を配置し、その性能評価を実行した。実験のセットアップを図5に示す。NiC/Ti 多層膜モノクロメーター及びFe/Si 磁気スーパ

ーミラーを用いて、波長 $9.15 \text{ \AA}$ に単色化された偏極中性子ビームを直径 2 mm のデフィニション・スリットを通し、その下流約 3 m の位置にある磁気レンズに入射させ、磁気レンズ終端に試料を配置した。試料から下流におよそ 3 m の位置にイメージングプレートを置き、中性子の像を観測した。試料は粒径 $2500 \text{ \AA}$ の SiO_2 である。得られた散乱強度関数 $I(q)$ を図6に示す。この結果から測定可能な移行波数の最小値は、 $6 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-1}$ よりも小さいことが判明した。これは試料・検出器間距離わずか 3 m で、従来の小角散乱法による測定限界を超える能力を有することを実証したことになる。

この集光型小角散乱法は磁気レンズに限ったものではなく、今回は議論していないが、物質レンズによる集光も同様に機能する。これらの集光系はSANS-Jへの搭載を行っている段階にあり、ポリマー等のソフトマター研究、微粒子磁性等の研究に使用することを予定している。またSANS-Uにおいても一つのオプションとして集光光学系を導入する可能性についての検討を進めている。

4. 集光型小角散乱の改良

集光型小角散乱法では、ダイレクトビームの結像面におけるプロファイルは極めてコントラストが高い。試料を置いた時に観測される散乱プロファイルは、ダイレクトビームのプロファイルを散乱角分布で畳み込んだものになっている。コントラストが十分高ければ、散乱プロファイルをダイレクトビームのプロファイルで分解するというデータ解析を実行できる可能性がある。このデータ解析手法の改良によって、 q の測定可能領域をより小さい方へ拡張できる可能性がある。この時に必要となるのは、ダイレクトビームを精度良く

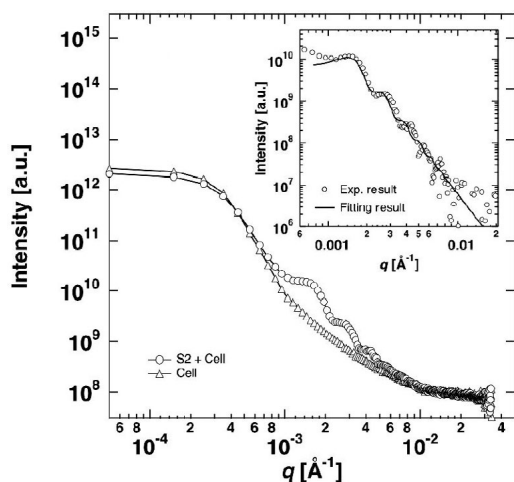


図6 集光型小角散乱測定例。試料は粒径 $2500 \text{ \AA}$ の

計数する検出器である。現在はイメージングプレートを用いており、ダイレクトビームを十分に計測できているので、このような方法の有効性を試して行く予定である。ただし、さらに信頼度の高い解析を可能とするためには、中性子をパルス計数できる画像検出器が望まれる。位置分解能が高く、高い計数率で使用可能な画像検出器の開発も並行して進めて行く予定である。

さて、デフィニション・スリットを通過する中性子強度の増加に伴い利用効率が増加する。一般にビームの空間的広がりと発散角を同時に圧縮することは原理的にできないが、どちらか一方であれば圧縮することができる。そこで、よりアクセプタンスの大きなレンズ系ができた場合にはさらなるオプションとして、中性子源から発散するビームを平行化し、より効率的に下流に導き、集光光学系を用いてデフィニション・スリットに集光させることを考える。図4ではこれらを含めたフルオプションの集光型小角散乱装置を概念的に示してある。最上流のビーム平行化素子には曲面スーパーミラーを含んだ中性子導管、上流側の一次集光には界面屈折光学を利用した物質レンズ、下流側の二次集光には磁気屈折光学を利用した磁気レンズ、結像面には2次元画像検出器が配置されている。ただし、具体的な光学素子の選定は定まったものではない。

5. おわりに

中性子光学研究グループでは、多様な可能性を秘めた中性子光学素子の系統的な研究を背景に、中性子散乱装置への具体的応用及びそれを元にした中性子科学研究の新展開を目指した研究を推進する。研究は定常中性子源から始め、パルス中性子源での応用までを視野に入れて行っていく。

現在、反射光学系をもとにした即発 γ 線解析装置へのビーム輸送系の改良及び試料位置への集光、粉末回折装置における試料位置への集光等、熱中性子集光も検討を行っており、NOPのサポートのもとに理化学研究所と緊密な協力のもとで実行する予定である。

参考文献

- 1) <http://nop.riken.go.jp/>.
- 2) H. M. Shimizu, Appl. Phys. A74 (Suppl.) (2002) S326.
- 3) J. Suzuki et al., J. Appl. Cryst. 36 (2003) 795.
- 4) T. Oku et al., Proc. ICANS-XVI ISSN1433-559X/ESS03-136-M 1 (2003) 355.
- 5) J. Suzuki et al., Proc. ICANS-XVI ISSN1433-559X/ESS03-136-M 1 (2003) 427., J. Suzuki et al., Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 120.
- 6) H. M. Shimizu et al., Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 5.
- 7) T. Oku et al., Nucl. Instrum. Methods A529 (2004) 116.
- 8) H. M. Shimizu et al., Physica B (in press).
- 9) T. Oku et al., Physica B (in press).

